Die Zeitschwellen für Stimmgabeltöne mittlerer und leiser Intensität

Inaugural-Dissertation

der Hohen Philosophischen Fakultät

der Universität Leipzig

zur Erlangung der Doktorwürde

vorgelegt von

Rudolf Bode

aus Kiel

ACAD. LIPSIENSIS BIBL.

Mit sechs Figuren

Leipzig

Wilhelm Engelmann

1906

Angenommen von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Sektion
auf Grund der Gutachten der
Herren Wundt und Des Coudres

Leipzig, den 30. Juli 1906

Der Procancellar
Marx

Sonderdruck aus Wundt, Psychologische Studien. II. Band. 5. Heft.

Meinen Eltern

in herzlicher Dankbarkeit

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41535720_0109

I. Einleitung.

In dieser Arbeit wird von neuem die Frage nach der geringsten Anzahl von Schwingungen, welche zur Erzeugung einer Tonempfindung nötig ist, gestellt. Seit mehr als 70 Jahren ist das Problem des minimum perceptibile von den verschiedensten Forschern und nach den verschiedensten Methoden behandelt worden. Eine möglichst exakte Beantwortung dieses Problems hat weittragende Konsequenzen für das gesamte Gebiet, nicht nur der Ton-, sondern auch der Geräuschempfindungen. Die Frage nach dem Wert oder Unwert der Resonanztheorie überhaupt, nach dem spezifischen Verhalten des Resonanzapparates im menschlichen Ohr ist aufs engste verknüpft mit unserem Problem. Die Tatsache, daß die Perzeption einer Tonempfindung gebunden ist an eine erst durch Summation isochroner Schwingungen erreichte nötige Elongation der Schwingungsfasern, hätte starke Beweiskraft für die Richtigkeit der Resonanztheorie. Die an verschiedene Tonhöhen und verschiedene Intensitäten der Reize gebundenen relativen Gesetzmäßigkeiten ergänzen in notwendiger Weise unsere durch die anatomisch-histologische Untersuchung gewonnenen Kenntnisse vom Bau des Resonanzapparates.

Alle bisherigen Untersuchungen zeigen deutlich, daß die Zeitschwelle abhängig ist von der spezifischen Beschaffenheit der einwirkenden Schwingungen, sodaß S. Exner zu dem Ergebnis kommt:

»Es kann aus dieser und anderen Ursachen die Frage nach der Anzahl von Tonwellen, welche genügen, eine wohlcharakterisierte Tonempfindung zu erzeugen, unseres Erachtens immer nur für einen bestimmten Fall beantwortet werden.« Ein solcher Schluß ist geeignet, die Problemstellung zu verwischen und die Lösung in aeternum zu vertagen. Soll die Theorie des Hörens wirkliche Förderung durch eine solche Untersuchung erfahren, so muß diese unter den einfachsten Bedingungen angestellt werden. Solche einfachste Bedingungen herzustellen ist unsere Aufgabe, und der Übergang von komplizierteren zu einfacheren Bedingungen bedingt den Fortschritt in der Lösung eines Problems.

Wollen wir aus unseren Ergebnissen einen Schluß auf die Existenz oder Nicht-Existenz eines akustischen Resonanzapparates machen, so müssen die Reize auch geeignet sein, alle Erscheinungen der Resonanz nach unseren Kenntnissen eines akustischen Resonanzapparates zu erzeugen. Mit anderen Worten: wir dürfen objektiv wo möglich nur mit Sinusschwingungen arbeiten und müssen alle diese Schwingung störenden Momente möglichst beseitigen.

Die Theorie der Geräusche hat bisher die bei der Entstehung einer Tonempfindung auftretenden Erscheinungen so gut wie garnicht verwerten können. Zwei Gründe sind für diese Vernachlässigung anzuführen. Erstens waren die bisherigen Untersuchungen durchweg nicht exakt genug in der Ausschaltung der objektiven durch die Apparate bedingten Geräusche. Subjektive Geräuscherscheinungen kamen so überhaupt nicht zur Geltung oder wurden in psychologisch komplizierten Verbindungen perzipiert. Das Material, welches aus den Untersuchungen über die Zeitschwellen für die Theorie des Geräusches hätte nutzbar gemacht werden können, blieb unsicher und trügerisch. Der zweite hauptsächliche Grund für die Vernachlässigung der Geräuscherscheinungen lag aber in der unzulänglichen Fragestellung. Statt daß man ohne Vorurteil das tatsächlich im Bewußtsein erlebte möglichst vollständig und genau beschrieb, richtete man die Aufmerksamkeit fast ausschließlich auf »den« Ton, welcher »erwartet« wurde. Ein Beispiel wird das gesagte noch deutlicher machen. In der Arbeit von Abraham und Brühl finden sich folgende Sätze: »Die Intensität der kurzen Töne war sehr gering und es war schwer den Ton aus dem Geräusch herauszuhören« oder: »Wir be-

haupten, daß in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle wohl durch dieselbe« (die geringe Anzahl der Schwingungen) »eine Tonempfindung hervorgerufen wird, nur ist der Ton sehr schwer herauszuhören.« Gleichgültig, ob das Geräusch objektiv (man arbeitete mit Sirenentönen) oder subjektiv oder durch beide Arten zugleich bedingt war, auf keinen Fall entspricht eine derartig bewußt isolierende Auffassung des tatsächlich in der Empfindung gegebenen den Grundsätzen empirischer Forschung. Erst durch den Vergleich der einzelnen Gesamterlebnisse darf nachträglich eine Isolation der einzelnen im Gesamterlebnis verschmolzenen Elemente stattfinden. Das objektive Geräusch (sofern es konstant bleibt und sich nicht mit der Höhe und Intensität des Reizes in seiner Qualität ändert) wird die durch den gewollten Reiz hervorgerufenen subjektiven Erscheinungen in konstanter Weise nach einer bestimmten Richtung hin beeinflussen. Es kann daher vielleicht durch Vergleichung der einzelnen Gesamterlebnisse in seiner objektiven Konstanz erkannt und von den die Mannigfaltigkeit bedingenden subjektiven Geräuschelementen begrifflich isoliert werden. Hinzukommt, daß durch den psychischen Zustand der Erwartung, einen bestimmten Ton zu hören, das Erlebnis selbst in seiner Qualität verändert wird. Ich glaube, daß die kleinen Schwellenwerte z. T. diesem subjektiven, assimilierenden Faktor der Erwartung ihren Ursprung verdanken. Das Gesamterlebnis wird nach der Richtung tonaler Färbung verändert. Diese Veränderung ist keineswegs als Urteilstäuschung aufzufassen, sondern in der Empfindung begründet (vergl. Krueger »Die Theorie der Konsonanz« Wundt, Psychologische Studien. Heft 4. 1906). In einer Untersuchung, die wie die vorliegende hauptsächlich der physiologischen Interpretation die peripher bedingten psychischen Empfindungskorrelate bieten will, müssen aber derartige zentral psychologische die Empfindung verändernde Faktoren der Auffassung, wie die Assimilation, nach Möglichkeit ausgeschaltet werden. In dieser Richtung bewegte sich schon die Methode von R. Schulze, welcher das unwissentliche Verfahren innehielt und daher auch schon über die Geräuschqualitäten wertvolle Beobachtungen machte.

Die Fragestellung, welche dieser Untersuchung ihre Richtung gegeben hat, lautet daher: Welcher Art sind die subjektiven Erlebnisse, welche an die Einwirkung nur weniger Tonschwin-

gungen verschiedener Höhe und Intensität gebunden sind? und: Welche konstanten gesetzmäßigen Zusammenhänge ergibt die vorurteilslose Vergleichung des quantitativen und qualitativen Befundes?

II. Historische Übersicht und Kritik der bisherigen Untersuchungen.

A. Allgemeine Vorbemerkungen.

a. Obertöne.

Eine exakte Lösung des Zeitschwellenproblems hat zur Voraussetzung, daß dem perzipierenden Organe eine Anzahl einfacher Sinusschwingungen von bestimmter Frequenz geboten werden, mit anderen Worten, daß alle Töne anderer Frequenz d. h. die Obertöne ausgeschaltet werden. In keiner der vorliegenden anderen Untersuchungen sind die Obertöne hinreichend berücksichtigt worden. Man begnügte sich mit qualitativen Angaben, die Obertöne seien nur sehr schwach in dem Tone enthalten oder der Ton sei auch bei wenig dargebotenen Schwingungen in seiner Höhe deutlich bestimmbar, eine »Täuschung« ausgeschlossen gewesen. Aber solange wir das Verhalten der perzipierenden Organe nicht genau kennen, haben derartige Angaben wenig Wert. Auf keinen Fall darf die Resonanzhypothese bereits bei der Beobachtung als richtig vorausgesetzt und der Wert oder Unwert einer Beobachtung darnach bestimmt werden. Wir wissen nicht, welchen Anteil und welchen Einfluß gleichzeitige Schwingungen anderer Frequenz auf die Wahrnehmung eines bestimmten Tones haben. So ist z. B. mit Sicherheit anzunehmen, daß die subjektive Verstärkung des Grundtones durch sekundäre Differenztöne der Obertöne auch im perzipierenden Organ ihr Korrelat hat. Bei den bisher vorliegenden Untersuchungen ist es keineswegs ausgeschlossen, daß ein Oberton in einer der höheren Oktaven mit dem objektiven Geräusch zu einem einheitlichen tonalen Erlebnis verschmilzt, dessen Tonhöhe der erwarteten und durch die Erwartung assimilativ vorbereiteten Tonhöhe gleich ist, umsomehr als eine direkte Analyse der Empfindung bei der Kürze des Reizes schwierig ist. Es muß somit an eine exakte Untersuchung die Forderung der Auslöschung aller irgendwie in Betracht kommenden Obertöne gestellt werden.

Durch den von Krueger beschriebenen, nach dem zuerst von Grützner und Sauberschwarz eingeführten Prinzip (Pflügers Archiv Bd. 61, S. 1 ff.) konstruierten Interferenzapparat läßt sich dies auch leicht erreichen (s. u.).

b. Intensität.

Es ist das Verdienst der Arbeit von Abraham und Brühl, den Einfluß der Intensität wieder stark betont zu haben. Vor ihnen haben auch schon Kries und Auerbach die These aufgestellt, daß die Zahl der nötigen Schwingungen nicht von der Tonhöhe, sondern von der Intensität der Erregung abhängig sei. Auch Villari und Marangoni haben mit verschiedenen Intensitäten gearbeitet. Die objektive Intensitätsmessung gehört bis auf den heutigen Tag zu den schwierigsten Problemen der physikalischen Akustik. Wir haben noch keine Möglichkeit auf eine einfache und schnelle Art die Intensität exakt zu bestimmen. Aber die Feststellung der objektiven Intensität ist bei unserem Problem nicht unbedingt erforderlich. Es genügt die subjektive Vergleichung. Denn die stets herrschenden Gesetzmäßigkeiten müssen, soweit sie von der Intensität abhängig sind, auch bei gleicher subjektiver Intensität, wenn auch vielleicht in einer transformierten Form, zu Tage treten. Wir werden hierauf später zurückkommen in dem Kapitel, in welchem wir die auf Grund objektiv gleicher Intensitäten gewonnenen Ergebnisse von Hensen den unserigen gegenüberstellen. Eine exakte Untersuchung erfordert jedoch, daß Einrichtungen getroffen werden, welche die beiden subjektiv auf Intensität zu vergleichenden Töne von einander isolieren und welche eine schnelle Veränderung der Intensität des anzugleichenden Tones zulassen.

Der Einfluß der Intensität muß uns auch verhindern, Ergebnisse, welche aus der Untersuchung nahe beieinanderliegender Töne von mittlerer Tonhöhe gewonnen werden, auf das ganze Tongebiet zu erweitern. Daß z. B. die größere Empfindungsintensität hoher Töne u. a. auch in funktionellem Zusammenhang mit der Zeitschwelle steht, ist sehr wahrscheinlich.

B. Die bisherigen Versuchsmethoden und ihre Ergebnisse.

Alle bisherigen Untersuchungen haben zur Voraussetzung zwei toto genere von einander verschiedene Versuchsanordnungen, je nach-

dem sie auf eine plötzliche oder konstante Tonerzeugung hinzielen. Im ersten Falle werden nur wenige Schwingungen überhaupt objektiv erzeugt und in ihrer Gesamtheit als Reiz verwendet, im anderen Falle wird eine konstant tönende Tonquelle vom Beobachter akustisch isoliert und deren Schwingungen durch geeignete Vorrichtungen während eines bestimmten variierbaren Zeitintervalls als Reiz dem Beobachter zugeführt. Im ersten Falle wird durchweg mit Sirenentönen gearbeitet, im letzten Falle mit Stimmgabeltönen. In der Mitte zwischen beiden Versuchsanordnungen steht die Versuchsanordnung von Exner und Pollak (s. u.).

a. Die Versuche mit plötzlicher Tonerzeugung.

Gegen diese Methode muß der prinzipielle Einwand erhoben werden, daß der Reiz nicht in der nötigen Einfachheit erzeugt werden kann. Die Entstehung eines Schwingungsvorganges erzeugt in dem umgebenden Medium kompliziertere Verhältnisse als die Ausbreitung der Schallwellen eines elastisch schwingenden Körpers über ein größeres räumliches Gebiet. Dieser Einwand muß umsomehr erhoben werden, als bei den Untersuchungen mit plötzlicher Tonerzeugung der Beobachter durchweg in unmittelbarer Nähe des tonerzeugenden Instrumentes beobachtete.

Die Sirene (Loch- und Zahnradsirene) ist wenig geeignet als tonerzeugendes Instrument zu dienen. Nicht Schwingungen eines elastischen Körpers, sondern Luftstöße mit allen ihren spezifischen nicht abtrennbaren Eigenschaften veranlassen den Erregungsvorgang im perzipierenden Organ. Dazu kommen Tongeräusche der mannigfachsten Art, die alle in der Tonerzeugung selbst ihren Ursprung haben und deren Beseitigung kaum möglich ist: Unterbrechungstöne, Schwingungen des Lochrandes (Aluminium!), sehr intensive Obertöne, Wirbelgeräusche bei der plötzlichen Luftverdünnung, Anblasegeräusche. Die Intensität des einzelnen Luftstoßes ist überdies abhängig vom Luftquantum.

Vor allem aber sind es psychologische Fehler, welche die Sirene als eine sehr ungeeignete Schallquelle erscheinen lassen. Die rasche Wiederholung der einzelnen Stoßperioden bedingt nicht nur eine Veränderung des Gesamtzustandes des Beobachters, sondern auch der Gehörsempfindung. Es wird eine stärkere Heraushebung des

erwarteten tonalen Teilinhaltes herbeigeführt. Bei den hohen Tönen können die einzelnen Perioden zuletzt kaum noch auseinandergehalten werden, wenn nicht gar eine Summation der Energien im Gehörorgan eintritt.

Alle diese Faktoren, zusammen mit den bereits früher erwähnten psychologischen Faktoren der Erwartung und der Assimilation mögen es bewirkt haben, daß die Zahl der zur Perzeption einer Tonempfindung nötigen Schwingungen von allen Forschern, die mit Sirenentönen (oder diesen ähnlichen) gearbeitet haben, viel kleiner angegeben wird als von den mit Stimmgabeln arbeitenden Forschern. Als Minimum werden durchschnittlich zwei Impulse angegeben. Nach dem oben gesagten darf aber dieses Ergebnis nicht dahin verallgemeinert werden, daß auch zwei Schwingungen jedes elastischen Körpers hinreichen, um eine Tonempfindung zu erzeugen. Bei Savart (vgl. Lit.) heißt es: »Il résulte de là, 1° que deux chocs (!) ou battements successifs suffisent pour constituer un son comparable, et que, par conséquent (!), il faut quatre vibrations simples (!) pour donner le même résultat; . . . . . 3° enfin, que le temps pendant lequel un son doit durer pour être perçu dépend uniquement de l'intervalle qui existe entre deux des battements périodiques qui le constituent; par conséquent, que ce temps est d'autant plus court que le son est plus aigu.« Dieselbe Angabe von zwei Schwingungen finden wir bei Seebeck und Ohm (vgl. Lit.). Pfaundler (Lochsirene) kommt zu dem Resultat: »Daß im Minimum zwei Schallimpulse auf die mitschwingenden Teile des Ohres genügen können, um die Empfindung eines Tones hervorzubringen, und daß diese Empfindung durch rasche Wiederholung zum Bewußtsein gebracht werden kann[1].« Zu ähnlich

[1]) Diese zweideutige Stelle ist dahin interpretiert worden, daß Pfaundler Empfindung mit Erregung verwechsele und durch die Wiederholung eine Summation der physiologischen Energien herbeigeführt werde. Die Wiederholung scheint bei Pfaundler eine rein psychologisch-apperzeptive Wirkung auszuüben. Denn bei der Deutung dieser Stelle ist doch zu berücksichtigen, daß bei der Pfaundler'schen Anordnung zwischen den Doppelschwingungen immer eine größere (physikalisch leere Zeitstrecke eingeschoben ist, welche zwar infolge der längeren Dauer der physiologischen und psychischen Erregung (als die physikalische) subjektiv ausgefüllt wird, aber doch einer Steigerung der Intensität der physikalischen Erregung und Empfindung entgegenwirkt. Die Wiederholung führt also doch vor allem nur zu einer zeitlich längeren Darbietung der Qualität des Reizes, welche für die Apperzeption der Qualitäten der so entstehenden Vorstellung günstig ist. Eine einmalige Dar-

niedrigen Zahlen kommt Max Meyer (Holzsirenenscheibe, welche bis auf eine kleine Anzahl von Löchern durch Korkstückchen verstopft werden konnte. Das Anblasen geschah durch eine Glasröhre). Er fand folgende Zahlen:

1. Tonhöhe = 176 Tonstöße pro Sek.:
bei vier Tonstößen »nahmen die Tonstöße einen tonähnlichen Charakter an«,
fünf Tonstöße ergaben »deutliche Tonstöße von der richtigen Tonhöhe 176«.
2. Tonhöhe = 352 Tonstöße pro Sek.:
bei drei Tonstößen war die Tonhöhe »deutlich erkennbar«,
3. Tonhöhe = 704:
Der Ton der Stöße war »bei drei sowohl wie auch bei zwei geöffneten Löchern erkennbar. Man konnte die Tonhöhe bestimmen, würde den Ton dabei aber wahrscheinlich um ein oder zwei Oktaven (!) zu tief geschätzt haben«.
4. Tonhöhe = 352 (die einzelnen Perioden hatten gegeneinander Verschiebung der Phase):
bei zwei Löchern war »keine Spur von Toncharakter« zu hören,
drei Löcher ergaben »etwas tonähnliches im Geräusch«,
bei vier Löchern wurde die Tonhöhe »merklich«,
bei fünf Löchern war sie klar erkennbar.

Abraham hat die Versuche nachgeprüft und gefunden, daß auch bei ganz verstopfter Löcherreihe ein wenn auch schwacher Ton gehört wurde, dessen Tonhöhe der Anzahl der Korkstückchen entsprach. Dasselbe hat mir Krueger mündlich bestätigt. Abraham und Brühl (Lochsirene) kommen zu dem Ergebnis, »daß wir für höchste Töne mehr Schwingungen brauchen als für tiefere und daß die Höhengrenzen ziemlich proportional den absolut erforderlichen Schwingungszahlen wachsen.« Als Höhengrenzen werden angegeben

für	2	Schwingungen	die Tonhöhe	3168
»	3	»	»	3960
»	4	»	»	5060
»	5	»	»	6000
»	10	»	»	7040.

Die Abhängigkeit dieses Ergebnisses von der Intensität wird stark betont. — Von den anderen Arbeiten unterscheidet sich die Abraham-Brühlsche durch die sorgfältige Registrierung der Geräusch-

bietung von zwei Schwingungen würde dagegen nicht nur eine schwächere, sondern vor allem eine kürzere Empfindung erzeugen, so daß ihrer qualitativen Wiedererkennung Schwierigkeiten erwachsen können.

erscheinungen. Leider waren die objektiven Geräusche so stark, daß eine hinreichende Isolation des subjektiven Faktors, der zweifellos vorhanden war, unsicher bleibt.

Kohlrausch lies ein Stück Zahnrad durch ein fallendes Pendel an einem Kartenblatt vorbeischlagen und erzeugte durch die Anzahl der Zähne die gewünschte Anzahl von Impulsen. Er fand zwei Impulse als hinreichend. Doch lassen sich aus diesen Versuchen keine zwingenden Schlüsse ziehen. Durch die Interruptionen wird der Ton in seiner Qualität stark verändert. Nachschwingungen, Eigentöne und Obertöne des Kartenblattes und der Apparate sind schwer zu isolieren. Die wechselnde Geschwindigkeit des fallenden Pendels verleiht den einzelnen Impulsen verschiedene Energie. Die ersten Schwingungen einer zum Tönen gebrachten Tonquelle benutzten auch von Kries und Auerbach, sowie Martius bei ihren Reaktionsversuchen. Ihre Ergebnisse hängen zum Teil von psychologischen und zentralphysiologischen Bedingungen ab und können daher zur physiologischen Interpretation elementarer Sinneserlebnisse nicht ohne weiteres verwandt werden.

Eine eigenartige Methode finden wir bei Exner und Pollak (vgl. Lit.). Sie benutzten rotierende Stimmgabeln und bestimmten die Zahl der Umdrehungen, bei welcher die durch schnellere Rotation auch immer schneller eintretende Phasenverschiebung den gleichzeitig immer leiser werdenden konstanten Ton gerade auslöschte. Die Schwingungen wurden entweder dem Ohre direkt zugeführt oder durch ein Telephon weitergeleitet. Im ersten Fall (starke Töne) genügen »zur Wahrnehmung des Tones nährungsweise zehn bis zwölf Schwingungen, ob derselbe eine Höhe von 240 oder nur von 160 hat. Bei der zweiten Versuchsreihe (schwache Töne), welche Töne von 240 bis 384 Schwingungen umfaßt, sind zur Erkennung derselben nährungsweise 13 Schwingungen erforderlich«. Die größere Anzahl der nötigen Schwingungen glaube ich dem Umstand zuschreiben zu müssen, daß die Untersuchungen einfache Schwingungen einer Stimmgabel zur Voraussetzung hatten.

Den Untersuchungen von Hensen, welche mit den Ergebnissen dieser Arbeit in engster Beziehung stehen, werden wir am Schlusse ein besonderes Kapitel widmen.

b. Die Versuche mit konstanter Tonerzeugung.

Die Versuche mit konstanter Tonerzeugung erfordern eine viel größere Differenzierung der Versuchsanordnung als die Versuche mit plötzlicher Tonerzeugung, zumal wenn man die Intensität hinreichend berücksichtigt. Die hauptsächlichsten Schwierigkeiten sind folgende:

1. Schalldichter Abschluß des konstant klingenden Tones vom Beobachter;
2. Herstellung geräuschloser Tonquellen, deren subjektive Intensität innerhalb einer bestimmten Grenze beliebig variiert werden kann, ohne daß die objektive Intensität, d. h. die Amplitude des schwingenden Körpers geändert wird;
3. Ausschaltung aller objektiven Geräusche;
4. Herstellung genau meßbarer Zeitminima durch möglichst exakte momentane Öffnung und Schließung der Schalleitung;
5. Ausschaltung der Knochenleitung.

Die bisherigen Untersuchungen haben diese Schwierigkeiten der Technik mehr oder minder vollkommen zu lösen versucht. Die Versuchsergebnisse zeigen durchweg eine größere Anzahl von nötigen Schwingungen als bei der oben besprochenen Methode, sie variieren auch innerhalb viel weiterer Grenzen. Diese Variation ist vor allem bedingt durch die mehr oder minder unvollkommene Öffnung und Schließung der Leitung. Die älteste Arbeit ist die von Villari und Marangoni (vgl. Lit.). Sie fanden die Zahlen:

Tonhöhe:	288	Schwingungen	640	1280	
Schwelle:	3,3	»	5,0	6,8	für leise Töne
	2,7	»	4,5	5,8	für starke Töne.

Der Wert dieser Zahlen liegt in ihren relativen Verhältnissen. Starke Töne brauchen weniger Schwingungen als leise Töne gleicher Tonhöhe.

Mach stellte Verschluß und Öffnung der Leitung durch ein rotierendes, mit einem Ausschnitt versehenes Rad her. Er fand folgendes Resultat: »Erhält das Ohr zu wenige Schwingungen, so nimmt man keinen Ton mehr wahr, sondern einen kurzen trockenen Schlag, an dem man keine Tonhöhe mehr unterscheidet. Ein tiefer Ton von 256 einfachen Schwingungen war erst bei vier bis fünf

Schwingungen als Ton von bestimmter Höhe erkennbar, bei zwei bis drei Schwingungen gab er bloß einen trockenen Schlag. Bei tiefen Tönen treten die Obertöne (!) deutlich erkennbar hervor, wenn der Grundton durch die Kürze seiner Dauer bereits unkenntlich ist«.

Exner benutzte durch Resonatoren verstärkte elektrische Gabeln. Durch einen von der Atwoodschen Fallmaschine getriebenen Rahmen wurde für kurze, variable und meßbare Zeiten Verschluß und Öffnung eines Schlauches hergestellt. Bei der Tonhöhe 128 gaben 17, bei der Tonhöhe 64 gaben 16,8 Schwingungen »die erste Spur einer Tonempfindung«. Der tiefere Ton braucht also doppelt soviel Zeit als der höhere. Den Tonwellen, die in das Ohr geleitet wurden, ging eine mächtige Talwelle voraus, welche beim Aufschnellen des zugequetschten Schlauches entstand und eine intensive Gehörsempfindung (dumpfer Stoß) auslöste. Diese Abklemmung eines Schlauches ist übrigens eine wenig exakte Form des Verschlusses.

Rudolf Schulze regulierte die Zeit der Einwirkung durch ein schweres Pendel, das eine in den Schlauch eingeschaltete Hahnvorrichtung öffnete und schloß[1]). Er untersuchte die Tonhöhen von 64 bis 360. Die Zahlen differieren sehr stark in den verschiedenen sukzessiven Übungsperioden und sind zuletzt außerordentlich klein (1,8 Schwingung!)[2]). Ähnlich geringe Zahlen fanden Cross und Maltby bei ihren Telephonuntersuchungen (für C^1 0,88, für C^2 1,78 Schwingung). Doch ist die Versuchsanordnung ganz unrein. Die niedrigen Schwellenwerte sind höchstwahrscheinlich durch Eigentöne der Telephonplatte bedingt.

---

[1]) Vgl. die Beschreibung der Anordnung bei Wundt, Physiol. Psychologie II^5 1902, S. 81 u. 91 und R. Schulze, Wundt, Phil. Stud. Bd. 14, S. 471.

[2]) Die Resultate seiner nicht selbständig veröffentlichten Versuche über die Zeitschwelle siehe Wundt, Phys. Psych. a. a. O. Da bei seinen Versuchen, wie oben erwähnt, die Unwissentlichkeit des Verfahrens strenge eingehalten war, beruhen seine kleinen Zeitwerte wahrscheinlich vor allem auf der größeren Intensität der Reize. Dazu kommt noch ein Nachhallen des Tones in der langen Leitung und die in seiner Eichung nicht inbegriffene Zeit kurz vor und nach der vollen Öffnung des Hahnes, in der, wie Schulzes Protokolle selbst angeben, der Ton nicht völlig abgeschlossen war.

III. Die Versuchsanordnung.

Die folgenden Untersuchungen wurden ausgeführt im Psychologischen Institut Leipzig in der Zeit von WS. 1904/5 bis WS. 1905/6. Dem Direktor des Instituts Herrn Geheimrat Professor Dr. Wundt bin ich für die freundliche Unterstützung und das Interesse, welches er meiner Arbeit entgegenbrachte, zu großem Dank verpflichtet, ebenso Herrn Professor Dr. Krueger, unter dessen Leitung die Versuche ausgeführt wurden. Auch allen Herren, die als Versuchspersonen an der Arbeit teilnahmen, danke ich noch einmal an dieser Stelle, vor allem Herrn Professor Dr. Bazala und Herrn stud. Kästner, ohne deren bereitwillige Mitarbeit ein großer Teil der zeitraubenden Versuche nicht hätte ausgeführt werden können[1]).

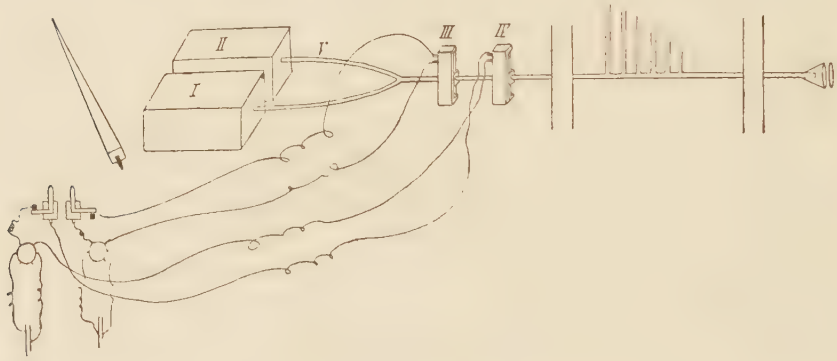

Fig. 1. Schematische Darstellung der Gesamtanordnung.

Für die Anordnung standen mir drei Räume zur Verfügung, welche in einer Flucht am Ende des Laboratoriums lagen. Das mittlere Zimmer war das sogenannte Stillzimmer (genaue Beschreibung bei Krueger, Philosophische Studien Bd. 18). Das Beobachterzimmer ging auf den Hof hinaus, dessen Geräusche im dritten Stockwerk nicht zu hören waren. 1,50 m über dem Boden befand sich eine runde Öffnung zum Durchlegen der Schalleitung. Die Leitungsrohre (Messing) waren in ihrer ganzen Länge umgeben von einer dichten

[1]) Versuchspersonen waren außer den genannten die Herren Dr. Vancauvelaert, Dr. Reuther, Dr. Spearmann, Dr. Ségal, stud. Kafka, stud. Clément, stud. Ziembinski, stud. Stefanowski, stud. Nikitin.

Wattepackung, die sich an den Durchbruchsstellen zu großen Bäuschen erweiterte. Die Versuchsanordnung hat im Laufe der ersten zwei Semester kleinere und größere Umänderungen erfahren. Es würde viel zu weit führen, diese Abänderungen im einzelnen anzuführen. Ich begnüge mich damit, die Versuchsanordnung in ihrer endgültigen Form zu beschreiben, indem ich die zu überwindenden Schwierigkeiten der Reihe nach bespreche.

a. Isolation des Tones.

Die Tonquellen (el. Stimmgabeln) standen in länglichen Holzkisten (vgl. Fig. 1, *I* und *II*). Diese waren inwendig quadratisch mit Eisenblech ausgeschlagen, dessen Ränder und Ecken verlötet wurden. Zwischen den sehr starken Holzwänden und dem Eisenblech befand sich eine 2 mm dicke Pappschicht. Eine an den Rändern mit Polstern versehene Klapptür schloß den Kasten. Zur Aufnahme der Schallwellen diente ein runder, durch Zeug völlig gedämpfter Eisenblechtrichter (Fig. 6, *a*). Diese Untersuchung hat aufs neue bewiesen, daß die Isolation akustischer Wellen eins der schwierigsten Kapitel der physikalischen Akustik ist. Trotzdem zwischen dem Beobachter- und dem Experimentatorzimmer das Stillzimmer lag, konnte nicht in allen Fällen ein schalldichter Abschluß erzielt werden. Die tiefen Töne können viel weniger isoliert werden als die hohen Töne. Umgekehrt verloren in der Schalleitung die tiefen Töne viel stärker an Intensität als die hohen Töne. Es war unmöglich, mittelstarke tiefe Stimmgabeltöne von direkter Leitung zu isolieren, andererseits sank die Intensität leiser tiefer Stimmgabeltöne innerhalb der Leitung sehr schnell unter die Grenze des Hörbaren. Ein großer Teil der Versuchsreihen mit tiefen Tönen mußte abgebrochen oder von der Verwertung zu Schwellenbestimmungen ausgeschlossen werden. Das Optimum der Intensität mußte vor jeder Versuchsreihe neu bestimmt werden. Oft trat der Fall ein, daß der Ton nicht mehr direkt, d. h. bei geschlossener Leitung gehört wurde, bei offener Leitung aber zu schwach war, um noch brauchbar zu sein. Es kam vor, daß die Störungen durch direkte Leitung erst während der Versuche hervortraten, indem der Beobachter, der die Tonhöhe des Reizes nicht kannte, den Ton »irgendwo in der Umgebung« zu hören glaubte, sobald die Schwelle überschritten war. Qualitativ zeigten

sich derartige Störungen in starken Kontrasterscheinungen. — Ganz anders verhielten sich die hohen Töne. Mittelstarke hohe Töne von der Tonhöhe 256 wurden nur selten, von der Tonhöhe 384 und höhere nie direkt gehört.

b. Die Tonquellen.

Als Tonquellen dienten elektrische Gabeln neuester Konstruktion von Zimmermann. Die Tonhöhen waren 128, 256, 384, 512 und 640 Schwingungen. Die Gabel 640 mußte aber schließlich ausgeschaltet werden, da die Intensität auch bei starken Strömen unterhalb der brauchbaren Grenze blieb. Die Kontakte waren Trockenkontakte (Platindrähte). Die Gabeln 384 und 512 funktionierten ausgezeichnet. Die Gabeln 128 und 256 störten oft den Gang der Versuche dadurch, daß die Kontakte infolge der starken Amplituden verbogen wurden, wenn sie nicht gar, was oft vorkam, brachen. Am besten bewährte sich ein Kontakt, der einmal schleifenartig gebogen durch innere elastische Kräfte beim Anschlagen nach oben ausweichen konnte und an der Anschlagstelle in ein dünnes Blättchen auslief (vgl. Fig. 2). Der Unterbrechungsfunke und damit das an der Unterbrechungsstelle entstehende Geräusch wurde regelmäßig durch eine Nebenleitung mit starkem Widerstande beseitigt (vgl. Helmholtz, L. v. d. T. Anhang). Die Gabeln waren auf festen Holzbrettern montiert und zur Verstärkung der Resonanz von an der einen Querseite offenen Resonanzkästen überdeckt. Die durch das Aufschlagen der Kontakte entstehenden Nebengeräusche wurden von der Leitung völlig absorbiert, der Beobachter hörte ruhig klingende reine Stimmgabeltöne. Im allgemeinen klangen die Gabeln, was für die Hauptversuche unerläßlich ist, ungestört und ohne merkliche Intensitätsschwankungen halbe bis ganze Stunden fort. Die Störungen traten immer im Verlauf längerer Reihen auf.

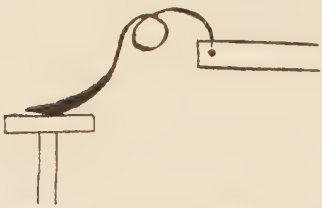

Fig. 2. Kontakt der elektrischen Stimmgabeln.

c. Die Tachistophone.

Zur Herstellung meßbarer Zeitminima bei möglichst exakter momentaner Öffnung und Schließung der Leitung dienten die beiden

von Krueger und Wirth konstruierten »Tachistophone« (Fig. 1, *III* und *IV*; Fig. 3). Die Konstruktion ist folgende: Innerhalb eines Eisenrahmens *a* befindet sich ein massiver Messingschlitten *b*, in welchem ein längliches Kästchen *c* aus Ebonit hinauf- und hinuntergleitet. Der Schlitten ist sorgfältig aus gehärtetem Stahl gearbeitet und das Kästchen gleitet geräuschlos. Die Schlittenwand, sowie das Kästchen sind zur Aufnahme je eines Rohrstückchens *e* von der Weite des Leitungsrohres durchbrochen. Im Hintergrunde des Kästchens wie im Hintergrunde der Schlittenwand befindet sich je eine dünne Platte, die mit sehr geringem Zwischenraum aneinander vorübergleiten und einen kleinen viereckigen Ausschnitt haben. Der Ausschnitt in der Schlittenwand ist 3 mm in der Horizontallinie lang, 1 mm breit; der Ausschnitt in der Hinterwand des Kästchens ist 1 mm breiter. Bei geschlossenem Strom wird das Kästchen vom Magneten angezogen, bei geöffnetem Strom von den beiden Federn, deren Spannkraft durch eine Schraube vergrößert und verringert werden kann, herabgerissen. Bei der Ausgangsstellung (Kästchen angezogen) stehen die beiden Ausschnitte im ersten Tachistophon wie in Fig. 4, im zweiten Tachistophon wie in Fig. 5. Beim ersten Tachistophon ist also die Leitung geschlossen, beim zweiten Tachistophon offen. Getrennte Stromkreise (Fig. 1) verbinden jedes Tachistophon mit den Hebelkontakten eines Pendels (s. u.). Öffnen wir nun durch Fallenlassen des Pendels nacheinander beide Stromkreise, so fallen beide Kästchen nacheinander herab. Beim ersten Tachistophon schiebt sich die Öffnung des Kästchens über die Öffnung der Schlittenwand, es entsteht Öffnung der Leitung; beim zweiten Tachistophon wird die Öffnung der Schlittenwand geschlossen, es entsteht Schluß der Leitung. Während der Zeit, die zwischen dem

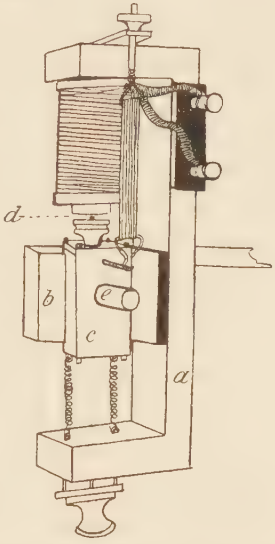

Fig. 3. Tachistophon ($^1/_2$ der natürlichen Größe).

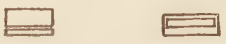

Fig. 4. Fig. 5.
Verschluß und Öffnung im ersten und zweiten Tachistophon bei Ausgangsstellung.

Fallen des ersten und zweiten Kästchens liegt, ist die ganze Leitung geöffnet. Die Falldauer des Kästchen betrug bei beiden Tachistophonen, wie graphisch festgestellt wurde, 2 bis 3 σ. Eine noch weitere Steigerung der Geschwindigkeit würde durch stärkere Federspannung leicht zu erreichen sein, hätte aber wenig Zweck, da schon die geringste Öffnung den Ton in maximaler Stärke hören läßt. Andrerseits entstehen durch die starke Hemmung der Bewegung Knallgeräusche. Die Hemmung wurde hergestellt durch entgegenwirkende Gummibänder verschiedener Spannung. Durch empirisches Ausprobieren wurde das optimum, d. h. diejenige Spannung der hemmenden Gummibänder bestimmt, welche das Geräusch verschwinden lies. Um Eigentöne der Federn zu verhindern, wurden diese mit kleinen Wattebäuschen umgeben. Die Geräusche, welche beim Öffnen des Stromes an den sich berührenden und nunmehr plötzlich auseinander gehenden Eisenteilen des Magneten und des Kästchens entstanden, wurden dadurch beseitigt, daß in die Eisenplatte des Kästchens ein kleiner Stift *d* eingelassen und dadurch die Berührungsflächen auf ein Minimum reduziert wurden.

Große Schwierigkeit bot die Ausschaltung des Knallgeräusches, welches bei Öffnung oder Schluß der Tachistophone an die im Innern des Apparates entstehende und sich bis zum Ohr des Beobachters fortpflanzende Luftwelle gebunden war. Das Knallgeräusch wurde auf folgende Weise beseitigt. Beim Niederfallen des Tachistophons wurde gleichzeitig die Öffnung eines kleinen durch die Schlittenwand nach außen führenden Kanals freigelegt. Dadurch konnte sofort ein Ausgleich der Luftspannung nach außen stattfinden und das Entstehen eines Knalles wurde verhindert. Das Entstehen einer schwachen Luftdruckwelle konnte dagegen nicht verhindert werden. Gelegentlich behaupteten meine besten Versuchspersonen, wenn ich die Tachistophone ohne Ton fallen lies, eine leise Geräuschempfindung wahrzunehmen. Sie beschrieben diese Empfindung als »leise Hauchempfindung«, »nur mit größter Anstrengung hörbares Geräusch, taktil«, »sehr leises ph« u. a. Auf jeden Fall darf behauptet werden, daß für die im folgenden verwerteten Versuchsreihen die Anordnung für den Beobachter geräuschlos funktionierte, daß alle durch die Bewegung der Apparate bedingten objektiven Geräusche beseitigt waren.

d. Die Abstufung der Hörzeiten.

Die Zeiten, welche zwischen dem Fallen des ersten und dem des zweiten Tachistophons verflossen, wurden variiert durch ein schweres, sehr exakt funktionierendes Kontaktpendel mit Schneidelager, welches im Zimmer des Experimentators stand. Die beiden Kontakte, welche die durch die Elektromagneten der Tachistophone gehenden Ströme schlossen und öffneten, konnten auf einer Millimeterskala gegeneinander verschoben werden. Als Stromquellen dienten sowohl für die Tachistophone als auch für die Stimmgabeln Akkumulatoren.

Die exakte Bestimmung der Zeitwerte geschah in folgender Weise. Die Kästchenröhre (Fig. 3, e) des ersten Tachistophons wurde durch ein Stück Schlauch, die Schlittenröhre des zweiten Tachistophons gleichfalls durch ein längeres Stück Schlauch verlängert. Das letztere endete in den von Krueger und Wirth zu phonetischen Versuchen konstruierten Kehltonschreiber (Psychol. Stud. I, S. 103), dessen Membran und darauf liegende Borste auf die geringsten Druckschwankungen reagierte. Brachte man die Borste an eine von Rußpapier umhüllte rotierende Trommel und rief man gleichzeitig durch Hineinblasen in den anderen Schlauch vor dem geschlossenen, ersten Tachistophon einen Luftdruck hervor und ließ dann das Pendel und dadurch die Tachistophone fallen, so konnte man die Größe der Zeit an der Kurve einer mit der Borste in gleicher Vertikalebene schwingenden elektrischen, mit einer Borste versehenen Stimmgabel ablesen. Die Zahl der Schwingungen, welche der Erhöhung der Kehltonschreiberlinie parallel liefen, ergab die Größe des Zeitintervalls. Korrigiert werden müßten die gefundenen Zahlen dann noch durch Addition der Differenz der Zeiten, in welcher die Luftdruckwelle und die Schallwelle vom ersten Tachistophon zum zweiten gelangte, da die Öffnung der Leitung beim ersten, der Schluß beim zweiten Tachistophon eintrat. Die unten angegebenen Hörzeiten sind also noch ein wenig zu klein. — Kontrolliert wurden diese Zeitbestimmungen durch eine direkte Eichung des Pendels, indem die beiden Kontakte je mit einem elektromagnetischen Zeitschreiber verbunden wurden, welche die Öffnung der Stromkreise auf eine rotierende berußte Trommel markierten. Die Schwingungskurve einer mit den beiden Zeitschreibern in gleicher Vertikalebene schwingenden

elektrischen Gabel lieferte die Größe des Zeitintervalls, welches dann noch wie oben korrigiert werden mußte.

e. Die Knochenleitung.

Das Leitungsrohr endete im Beobachterzimmer in einen Trichter aus. Der Rand des Trichters war umgeben mit einem Gummischlauch. Legte man das Ohr an diesen Trichter, so hörte man bei geöffneter Leitung den Ton bedeutend lauter als in einiger Entfernung. Die Verstärkung war wesentlich durch direkte Knochenleitung bedingt. Die Knochenleitung aber muß ausgeschaltet werden, weil sie für verschieden hohe Töne verschieden wirkt. Es wurde daher, völlig unabhängig vom Trichter, auf einem besonderen Stativ, ein eiserner Ring von 10 cm Durchmesser, 2 cm vom Trichterrand, 5 cm von der Öffnung der Schallleitung (die Schallleitung ragte etwas in den Trichter hinein) entfernt, senkrecht zur Richtung der Schallleitung, parallel zum Trichterrand sicher befestigt. Der Beobachter legte seinen Kopf so an den Ring, daß die Ohrmuschel ungefähr in der Mitte war. Dadurch wurde erstens die direkte Knochenleitung ausgeschlossen und zweitens erreicht, daß das Ohr immer in gleicher Entfernung von der Trichtermündung blieb.

f. Die Intensität.

Da diese Untersuchung zu dem Zwecke unternommen wurde, verschiedene Tonhöhen bei gleicher subjektiver Intensität zu untersuchen, so mußten Einrichtungen getroffen werden, um 1. zwei gleichzeitige Töne genügend isolieren und sie kurz nacheinander dem Beobachter darbieten zu können, 2. die Intensität des subjektiv in bezug auf Intensität anzugleichenden Tones beliebig variieren zu können.

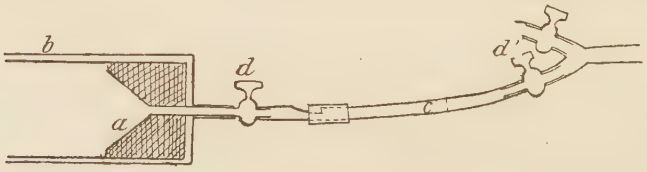

Fig. 6. Teilrohr mit Intensitätsvariator.

Die erste Forderung erfüllten die beiden oben beschriebenen Kasten. (Fig. 1, *I* und *II*, Fig. 6 *b*.) Sie waren durch ein Gabelrohr (Fig. 1,

V, Fig. 6, *c*) mit der Hauptleitung verbunden. Jedes der beiden Teilrohre hatte am Anfang und kurz vor der Vereinigung mit dem anderen Teilrohr je einen Hahn (Fig. 6, *d* und *d'*) um die Leitung dicht abschließen zu können. Der zweite Hahn (*d'*), diente gleichzeitig dazu, eine Interferenzwirkung des Teilrohres zu verhindern. Die zweite Forderung wurde in vollkommener und einfacher Weise erfüllt durch einen dreieckigen 2 cm langen Ausschnitt in jedem Teilrohr, dessen Öffnung durch einen hin- und herzuschiebenden Mantel von Messing vergrößert und verringert werden konnte. Vollständige Öffnung bewirkte trotz Öffnungsstellung der Tachistophone vollständige Auslöschung des Tones für den Beobachter. Der einzige Mangel bestand darin, daß die Intensitätsschwankungen auch bei sehr geringem Hin- und Herschieben außerordentlich groß waren, sodaß es sich empfehlen dürfte, künftig die Bewegung des Mantels durch eine Mikrometerschraube zu bewirken.

g. Die Interferenz.

Der von Krueger (Philos. Studien 17, 223) beschriebene Interferenzapparat war im sogenannten Stillzimmer in die Hauptleitung eingefügt. Die Interferenzröhren wurden so eingestellt, daß bei den Tönen mittlerer Tonhöhe die beiden ersten Obertöne durch je drei Röhren, bei den tiefen Tönen (128 Schw.) durchweg die ersten vier Obertöne ausgelöscht wurden.

IV. Die Methode.

Den Untersuchungen zu Grunde gelegt wurde die Methode der Minimaländerungen. Das Zeichen zum Beginn jedes einzelnen Versuches wurde durch ein elektrisches Klingelsignal vom Beobachter gegeben. Fünf Sekunden vor Auslösung des Reizes (Fallenlassen des Pendels) erhielt dieser als Signal den trocknen, leisen Schlag einer gedämpften elektrischen Glocke. Darauf beschrieb der Beobachter die qualitative Beschaffenheit des Gehörten und bestimmte die Tonhöhe an einem großen Königschen Monochord. Bei der ersten Minimalreihe wurde beim kleinsten Zeitintervall (= o) angefangen, und das Intervall solange vergrößert, bis der Ton deutlich gehört wurde. Als Einheit der Intervallvergrößerung wurde das

Millimeter auf der Pendelskala festgehalten. Sobald der Beobachter den Ton hörte, wurde die Reihe abgebrochen und nunmehr an diesen jetzt konstant dargebotenen Ton ein anderer höherer oder tieferer in bezug auf Intensität angeglichen. Die Töne konnten innerhalb der Leitung bei dauernd geöffneten Tachistophonen durch Schluß und Öffnung der Hähne in den Zweigleitungen abwechselnd gegeben werden. Die Umschaltung des Interferenzapparates erforderte einige Zeit. Infolge fortschreitender Übung genügte später für die Vergleichung nur eine einmalige Darbietung des ersten Tones. Die Intensitätsvariation war durch den oben beschriebenen dreieckigen Ausschnitt leicht herzustellen. Sobald die Töne angeglichen waren, wurde mit dem zweiten Tone eine zweite Minimalreihe hergestellt, nunmehr von großen Hörzeiten bis o abschreitend. Es wurden auf diese Weise in Doppelreihen untersucht die Töne 384, 512 Schw. und 512, 384 Schw. und zwar beide von leiser und von mittelstarker Intensität. Tripelreihen wurden hergestellt von den Tönen:

leise: 128, 384, 512
mittelstark: 284, 384, 512

In diesen Tripelreihen wurden alle Einzelreihen, um gleichwertiges Material zu erhalten, mit allmählich aufsteigenden Hörzeiten untersucht und die Monochordbestimmung fortgelassen, da diese die Unkenntnis des Beobachters mit dem dargebotenen Tone zur Voraussetzung hat.

Untersuchungen mit allen vier Tönen anzustellen, verbot die starke Ermüdung des Beobachters, welche vor allem durch die angestrengte Beobachtung bedingt war.

Bei allen Einzelreihen wurde am Anfang oder Schluß, je nachdem mit ansteigenden oder absteigenden Hörzeiten gearbeitet wurde, die Hörzeit o ohne Ton (Leitung durch Hähne verschlossen) dargeboten. Auf diese Weise konnte der Zustand der Tachistophone beständig kontrolliert werden. Veränderungen in den Spannungen der Gummibänder (s. o.) verrieten sich durch Geräuscherscheinungen, welche durch Änderung der Spannungsverhältnisse jeweils beseitigt wurden.

Um das im einzelnen innegehaltene Verfahren zu veranschaulichen, teile ich im folgenden im Wortlaut mit die Protokolle von zwei vollständigen Versuchsreihen. Das erste enthält zwei Reihen der Töne

384 und 512 und stammt von Herrn Professor Bazala. Das zweite enthält drei Reihen der Töne 256, 384 und 512 und stammt von Herrn Dr. Kafka.

I.

Monochord: 384 Schw. = 36,8 cm.
Tonhöhe: 384. Intensität: mittelstark.

Reihenfolge der Versuche	Pendel mm	Pendel σ	Pendel Schw.	Monochord cm	Monochord Schw.	
1	□[1]	0	0			nichts,
2	gl[1]	0	0			Geräusch??
3	12	6,3	2,43			Geräusch, sehr kurz, explosivartig,
4	14	29,4	11,34			» schlagartig, etwas tonartig,
5	16	43	16,5			unklares tonartiges Geräusch, kurz,
6	18	54,6	21	37,8	373 +	klares tonartiges Geräusch,
7	20	64	24,6	37,4	377 +	Ton unklar, etwas geräuschvoll,
8	22	74	28,5	38,0	373 +	Ton am Ende geräusch- und explosivartig.
9	24	85	32,7	37,0	381 +	» » » » » »
10	26	94,5	36,45	37,6	375 +	kurzer Ton, ziemlich stark,
11	28	105	40,5	37,0	371 +	Ton, am Ende nicht geräuschlos.
	Tonhöhe: 512.					
1	28	105	54			kurzer Ton, Ausgang nicht geräuschlos,
2	26	94,5	48,6			» » , Ausgang abgebrochen, leiser,
3	24	85	43,6			ganz kurzer Ton, leise aber doch hörbar,
4	22	74	38			Ton verliert sich in einem ziemlich lauten Explosivgeräusch,
5	20	64	32,8			Ton sehr geräuschvoll endend,
6	18	54,6	28			Geräusch tonartig, abgebrochen, leise und kurz,
7	16	43	22			Geräusch tonartig und explosiv,
8	14	29,4	15,12			ganz leises abgebrochenes dumpfes Geräusch (Schlag),
9	12	6,3	3,24			Geräusch kaum hörbar,
10	gl	0	0			?
11	□	0	0			nichts,

II.

Tonhöhe = 256. Intensität: mittelstark.

Reihenfolge der Versuche	Pendel mm	Pendel σ	Pendel Schw.	
1	□	0	0	nichts,
2	gl	0	0	Geräusch?
3	12	6,3	1,62	Geräusch (P-Laut),

[1]) □ bedeutet: Hörzeit 0 bei geschlossenen Hähnen (ohne Ton),
gl » : » 0 » offenen » (mit Ton).

Reihenfolge der Versuche	Pendel mm	Pendel σ	Pendel Schw.	
4	14	29,4	7,56	Geräusch mit leisem hellen Beiklang.
5	16	43	11	» » P-Laut ohne jeden Beiklang,
6	18	54,6	14	» » dumpferem Beiklang,
7	20	64	16,4	» : P-K„ Toncharakter schon deutlicher,
8	22	74	19	noch kein ausgesprochener Ton, aber deutlich Toncharakter,
9	24	85	21,8	Toncharakter wieder etwas undeutlich,
10	26	94,5	24,3	Geräusch: T-T, dazwischen Ton wie erstickt,
11	28	105	27	noch kein reiner Ton,
12	30	117,6	30,24	Ton deutlich, daneben zwei labiale Geräusche.
				Tonhöhe = 384.
1	□	0	0	nichts,
2	gl	0	0	Hauch,
3	12	6,3	2,43	nichts,
4	14	29,4	11,34	nichts,
5	16	43	16,5	Geräusch, dumpf,
6	18	54,6	21	» , bereits ein gewisser tonartiger Beiklang,
7	20	64	24,6	Hauchartiger Ton zwischen zwei Labialgeräuschen,
8	22	74	28,5	Ton schon etwas deutlicher,
9	24	85	32,7	zuerst ein Explosivlaut, dann ein Ton,
10	26	94,5	36,45	Ton zuerst, dann ein Explosivgeräusch,
11	28	105	40,5	leiser Ton.
				Tonhöhe = 512.
1	□	0	0	hauchartiges Geräusch,
2	gl	0	0	nichts,
3	12	6,3	3,24	h
4	14	29,4	15,12	h
5	16	43	22	bereits eine Spur von Toncharakter,
6	18	54,6	28	ganz leiser hauchartiger Ton zwischen zwei Labiallauten,
7	20	64	32,8	Ton deutlicher,
8	22	74	38	» »
9	24	85	43,6	Ton ganz deutlich, wenn auch leise.

In der ersten Reihe des ersten Protokolls wird der Ton 384 durchweg am Monochord zu tief bestimmt. In der ersten Reihe (384) liegt das erste Auftauchen tonartiger Qualitäten zwischen zwei und elf Schwingungen. In der zweiten Reihe (512) sind 15 Schwingungen kaum noch als Geräusch wahrnehmbar.

Im zweiten Protokoll finden wir bei steigender Tonhöhe eine Abnahme der zur Wahrnehmung tonartiger Qualitäten nötigen Hörzeiten

(64 σ, 54,6 σ, 43 σ). Die Zahl der nötigen Schwingungen dagegen steigt mit wachsender Tonhöhe (16,4; 21; 22).

V. Die quantitativen Ergebnisse.

Die Schwelle wurde in jeder Reihe dort als erreicht angenommen, wo zum ersten Male etwas »tonartiges«, eine »Tonfärbung« usw. im Gesamterlebnis zu konstatieren war. Für die Berechnung der Schwellen wurden endgültig, als unter hinreichend gleichen Bedingungen stehend verwertet:

						Summe
	von mittelstarken Tönen					
6	Tripelreihen der Töne	256	384	512		18 Reihen
12	Doppelreihen » »		384	512		24 »
13	» » »			512	384	26 »
1	Einzelreihe des Tones			512		1 »
	von leisen Tönen					
4	Tripelreihen der Töne	128	384	512		12 »
1	Doppelreihe des Tones	128	384			2 »
5	Doppelreihen » »		384	512		10 »
3	» » »			512	384	6 »
						99 Reihen.

Die Berechnung der Schwellen geschah in der Weise, daß von den Tonhöhen 128, 256 die Schwellen direkt durch Mittelziehung, von den Tonhöhen 384, 512 aus den Reihen mit aufsteigenden Hörzeiten die untere, aus den Reihen mit absteigenden Hörzeiten die obere Schwelle bestimmt und dann aus beiden Schwellen die mittlere Schwelle bestimmt wurde.

Im Mittel ergaben sich folgende Werte:

	leise:		mittelstark:	
Tonhöhe	σ	Schw.	σ	Schw.
128	94,6	12,1088		
256			69,08 +	17,604
384	62,72	24,08	44,5 +	17,088
512	57,9	29,64	42,74	21,88

Die Störungen, welche durch direkte Leitung, durch zu geringe Intensität oder durch Brechen der Stimmgabelkontakte eintraten, haben verhindert, daß von den tiefen Tönen eine gleiche Anzahl von Reihen hat für die Schwellenbestimmung zur Verwendung kommen können. Die herrschenden Gesetzmäßigkeiten springen aber auch so deutlich hervor.

Zur Perzeption brauchen

1. Die leisen Töne bei gleicher Tonhöhe größere Hörzeiten und eine größere Anzahl Schwingungen als die mittelstarken Töne;
2. Die hohen Töne bei gleicher subjektiver Intensität kleinere Hörzeiten aber eine größere Anzahl Schwingungen als die tiefen Töne;
3. Bei gleicher subjektiver Intensität und bei steigender Tonhöhe erfolgt die Zunahme (Abnahme) der minimalen Schwingungszahlen (Hörzeiten) bei den tiefen Tönen schneller als bei den Tönen mittlerer Tonhöhe.

Eine Abweichung von der Regel 2 zeigen die Zahlen 17,604 und 17,088. Doch dürfte diese Abweichung verschwinden, wenn von 256 eine größere Zahl Reihen hätte verwertet werden können. Andrerseits ist sie ein Beweis für das langsame Steigen der zur Perzeption nötigen Anzahl Schwingungen bei den Tönen mittlerer Tonhöhe (vgl. Regel 3).

VI. Die qualitativen Ergebnisse.

a. Intensität.

Es bestätigt sich die auch von anderen Experimentatoren gefundene Tatsache, daß die Tonerregung mit der Hörzeit ansteigt. Unerwähnt gefunden habe ich in den früheren Arbeiten den Einfluß der Intensität auf die

b. Klangfarbe.

Der Verlauf der Klangfarbenänderung ist ein außerordentlich differenzierter. Bis zur vollen Apperzeption des Tones finden wir eine große Mannigfaltigkeit der verschiedensten Komplexqualitäten. Auf keinen Fall ist der Beginn einer Gehörsempfindung, die an einfache Schwingungen gebunden ist, immer ein Knallgeräusch. Die qualitative Beschaffenheit ändert sich nicht nur mit der Größe der Hörzeit, sondern auch mit der Intensität. Der charakteristische, durch die verschiedene Intensität bedingte Unterschied bleibt auch während des Verlaufs der leisen und mittelstarken Reihen bis zur vollen Apperzeption bestehen. Wir besprechen im folgenden die

qualitativen Erscheinungen in der Reihenfolge, wie sie sich bei der Minimalmethode von der kleinsten Hörzeit an darbieten.

1. Reine Geräuschempfindungen (bis zur Schwelle).

Bei den kürzesten Hörzeiten wurden nur reine Geräusche wahrgenommen. Wir finden eine große Mannigfaltigkeit der verschiedensten Geräuscharten. Der Charakter der Geräuscherscheinungen bei mittelstarken Tönen ist spezifisch verschieden von den Geräuscherscheinungen bei leisen Tönen. Er ändert sich mit zunehmenden Hörzeiten in folgender Weise:

bei mittelstarken Tönen:
(die Klammern fassen annähernd gleiche Hörzeiten zusammen)

- »sehr leises ph«
- »abgerissenes Geräusch«
- »kurzes Schnappen«
- »ganz kurzer Knax«

- »unbestimmtes schlagartiges Geräusch«
- »P-Laut«
- »Schnalzlaut«

- »knallartiges Geräusch«
- »dumpfes Geräusch wie ein Schlag«
- »unbestimmtes Explosivgeräusch«

- »zwiespältiges Geräusch«
- »zweiteiliges Geräusch«

bei leisen Tönen:

- »hauchartiges Geräusch«
- »kaum hörbares dumpfes Geräusch«
- »ganz schwaches Geräusch«

Der Gegensatz wird oft geradezu gegeben durch die Zeichen

Hieran schließen sich an die

2. Klanggeräusche (bis zur Apperzeption).

Eine noch viel größere Mannigfaltigkeit der Klangfarben finden wir in dem Reizgebiet von der Schwelle bis zur Apperzeption eines deutlichen Tones. Es findet sich ein kontinuierlicher Übergang vom Überwiegen des Geräusches in dem Klangganzen bis zum Überwiegen des Tones. Auch hier zeigen sich charakteristische Gegensätze zwischen mittelstarken und leisen Tönen, sowohl hinsichtlich der Mannigfaltigkeit, als auch in der Klangfarbe. Der Übergang

vollzieht sich in folgender Weise. (Die Klammern bedeuten wieder annähernd gleiche Hörzeiten):

bei mittelstarken Tönen:

- »Geräusch mit Toncharakter«
- »unklares tonartiges Geräusch«
- »Geräusch dumpf, tongefärbt«

- »hauchartige Tonfärbung«
- »Ton umhüllt«
- »ausgesprochene Tonfärbung«
- »Ton, aber geräuschvoll«

- »stoßartiger Ton«
- »rauher Ton«
- »schlagartiger Ton«
- »abgerissener Ton«
- »heiserer Ton«

- »disharmonischer Ton«
- »pfiffartiger Ton«

bei leisen Tönen:

- »Klang in weiter Ferne«
- »Ton leise verhüllt«
- »ganz leises weiches Pfeifgeräusch«
- »Spur von Ton, stärkere Hauchgeräusche«
- »Ton mit Rauhigkeit«

Hinsichtlich der größeren qualitativen Mannigfaltigkeit unterscheiden sich auch die hohen Töne von den tieferen. Einer meiner besten Beobachter charakterisierte die qualitativen Erscheinungen bei leisen, tiefen Tönen als »diffuse Tastempfindungen«. Die Intensität des Tones ließe sich kaum von den anderen Klangbestandteilen absondern. Das ganze bildete eine größere »Einheit«.

c. Tonhöhe.

Die Tonhöhe wurde durchschnittlich unterschätzt, d. h. am Monochord zu tief bestimmt. Bei 512 Schwingungen betrug die Abweichung im Mittel acht Schwingungen nach unten (= 504), bei 384 Schwingungen betrug sie drei Schwingungen nach unten (= 381). Verschiedene gleichzeitig zusammenwirkende Faktoren können diese Tatsache erklären. Ein objektiver Grund kann gesehen werden in dem Unterschiede der Klangfarben zwischen dem Stimmgabelton und dem Vergleichston des Monochord. Es ist sichergestellt, daß derartige Klangfarbenunterschiede die Angleichung eines Tones sehr erschweren können. Subjektiv ließe sich diese Herabziehung der

Tonhöhe durch die assimilierende Wirkung gleichzeitiger tieferer Geräuschkomplexe verständlich machen. Doch läßt sich vielleicht auch eine objektive physiologische Erklärung geben, in dem Sinne, daß durch die ersten Schwingungen von einer bestimmten Frequenz tiefer abgestimmte Teile der Basilarmembran im weiteren Umfang erregt werden, als der Teil von gleich abgestimmter Frequenz (s. u.).

d. Physiologische Interpretation.

Es kann hier nicht der Ort sein, die viel umstrittene Frage zu erörtern, ob wir für die Geräusche ein besonderes nur Geräusche perzipierendes Organ besitzen. Es darf aber betont werden, daß die große Einheitlichkeit und der kontinuierliche Übergang aller Geräuscherscheinungen in mehr oder minder bestimmte Tonerlebnisse, wie wir oben gezeigt haben, es wahrscheinlich macht, daß auch die Schnecke, abgesehen von etwaigen anderen Organen, gleichfalls im stande ist, Geräuschempfindungen zu vermitteln. Ob die Schnecke im stande ist, auf diffuse äußere Reize, wie sie den Geräuschempfindungen zu Grunde liegen, zu reagieren, ist eine ganz andere Frage. Zur Perzeption objektiver Geräusche könnten immerhin besondere Organe vorhanden sein, ohne daß dadurch die Möglichkeit aufgehoben würde, daß in der Schnecke selbst auch durch regelmäßige objektive Schwingungen Geräuschempfindungen ausgelöst werden könnten. Es ist auch nicht einzusehen, welche physiologischen Gründe dagegen sprechen sollten. Nehmen wir mit Hensen an, daß die Cortischen Zellen mit ihren Stäbchen sich von der Cortischen Membran trennen und an sie wieder anstoßen müssen, damit eine Tonerregung physiologisch zu stande kommt, so würde die Zahl der sich nach dem zweiten Impuls abtrennenden Stäbchen keineswegs auf die spezifische Membranstelle gleicher Frequenz beschränkt sein. Wenn wir von den Obertönen absehen, so könnten alle Stäbchen, welche Empfindungen bis einschließlich der tieferen Quarte und der höheren großen Terz vermitteln, durch Summation der Energiegrößen gegen die membrana Corti anschlagen. Denn alle Fasern der Basilarmembran innerhalb dieser Zone müssen in dem Augenblick des zweiten Impulses gleiche Schwingungsrichtung nach der membrana Corti zu haben, wenn die Resonanzhypothese als richtig vorausgesetzt wird. Erst im Verlauf der weiteren Impulse treten dann bei allen Fasern

ungleicher Frequenz durch Interferenz, plötzlichen Phasenwechsel Störungen ein, während die Fasern gleicher Frequenz die zur Erregung einer Tonempfindung nötige Elongation erlangen und etwa noch vorhandene leise Geräuschempfindungen übertäuben. Daß die Erregung einiger weniger Fasern und die Gesamterregung einer ganzen Zone auch in der Empfindung spezifisch verschiedene Erlebnisse zur Folge haben, ist sehr wahrscheinlich. Die Tatsache, daß die Tonhöhe am Monochord durchschnittlich tiefer bestimmt wurde, scheint mir in der größeren Breite der unteren Geräuschzone (= Quarte) mitbegründet zu sein. Doch sind weitere Untersuchungen nach dieser Richtung hin notwendig.

VII. Die Versuche von Hensen.

Daß leisere Töne größere Hörzeiten brauchen, um wahrgenommen zu werden als die mittelstarken Töne gleicher Tonhöhe ist eine Gesetzmäßigkeit, welche in paralleler Weise auch in anderen Sinnesgebieten zur Geltung kommt. Ob diese Abhängigkeit der Zeitschwelle von der Intensität des Reizes wesentlich zentral oder peripher bedingt ist, läßt sich auf Grund der vorliegenden Versuche nicht entscheiden. Die Resonanzhypothese würde diese Tatsache erklären, insofern die zur Perzeption nötige Schwingungsamplitude der resonierenden Organe durch die geringere Summation bei leisen Tönen später erreicht wird, als bei lauten Tönen.

Das weitere Ergebnis, daß die Anzahl der nötigen Schwingungen bei gleicher subjektiver Intensität mit der Tonhöhe wächst, befindet sich in bemerkenswerter Übereinstimmung mit den Versuchen von Hensen (vgl. Lit.). Hensen fand bei schneller kontinuierlicher Erhöhung oder Vertiefung eines Tones und bei gleicher objektiver Tonstärke, »daß es bedeutend schwerer ist, die tiefen Töne auszulöschen, als die viel lauteren hohen Töne.« (Vgl. Kongreßbericht.) Hensen fand ferner, daß die hohen Töne bei langsamer Steigerung der Geschwindigkeit viel leichter an Intensität verlieren als die niedrigen Töne.

Bei gleicher objektiver Intensität und gleichen überschwelligen Hörzeiten hatten die hohen Töne eine größere Empfindungsintensität als die tiefen Töne. Verminderte man hier die Hörzeiten, so

erlangten die tiefen Töne nach Qualität und Intensität das Übergewicht. Sie beanspruchten also zu gleicher Merklichkeit weniger Schwingungen als die hohen Töne. Diese Tatsache muß sich in noch höherem Grade bei subjektiv gleicher Intensität geltend machen, da in diesem Fall die objektive Intensität bei den hohen Tönen geringer ist, als bei den tiefen Tönen.

VIII. Ergebnisse dieser Untersuchung.

Wir fassen die Ergebnisse dieser Untersuchung zusammen:

1. Zur Perzeption brauchen die leisen Töne bei gleicher Tonhöhe größere Hörzeiten und eine größere Anzahl Schwingungen als die mittelstarken Töne.
2. Zur Perzeption brauchen die hohen Töne bei gleicher subjektiver Intensität kleinere Hörzeiten, aber eine größere Anzahl Schwingungen als die tiefen Töne.
3. Bei gleicher subjektiver Intensität und bei steigender Tonhöhe erfolgt die Zunahme (Abnahme) der minimalen Schwingungszahlen (Hörzeiten) bei den tiefen Tönen schneller als bei den Tönen mittlerer Tonhöhe.
4. An die Perzeption weniger einfacher Schwingungen ist eine große Mannigfaltigkeit der verschiedensten Geräusche gebunden (reine Geräusche, Klanggeräusche). Diese Geräusche sind subjektiven Ursprungs und entstehen mit großer Wahrscheinlichkeit im Cortischen Organ (unter Voraussetzung der Resonanzhypothese).

Literatur.

Savart, F., Notes sur la sensibilité de l'organe de l'ouïe. Ann. de chim. et phys. 44, 384. (1830.)

Seebeck, A., Beobachtungen über einige Bedingungen der Entstehung von Tönen. Pogg. Ann. 53, 417. (1841.)

Ohm, G. S., Über die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter Theorie der Sirene und ähnlicher tonbildender Vorrichtungen. Pogg. Ann. 59, 554. (1843.)

Helmholtz, H., Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik (1862). 5. Aufl. (1896).

Villari und Marangoni, Il nuovo Cimento 28 (2) I, 382. (1868.)
(Mir im Original nicht zugänglich gewesen.)

Mach, E., Physikalische Notizen. Lotos 23—25, 146. (1873—75.)

Exner, S., Zur Lehre von den Tonempfindungen. Pflügers Arch. XIII, 228. (1876.)
Vgl. ibidem XI, 417. (1875.)

Kries, J. von, und F. Auerbach, Die Zeitdauer einfachster psychischer Vorgänge. Du Bois Reymonds Archiv für Physiologie (1877). 297.

Pfaundler, M., Über die geringste absolute Anzahl von Schallimpulsen, welche zur Hervorbringung eines Tones nötig ist. Sitzungsber. d. Wiener Akademie (1877). Math. nat. Cl. 76 (2) 561. (1878.)

Auerbach, F., Über die absolute Anzahl von Schwingungen, welche zur Erzeugung eines Tones erforderlich sind. Wiedemanns Ann. 6, 591. (1879.)

Oppel, Neue Entscheidungsversuche über das Zustandekommen einer Tonempfindung, insbesondere über das absolute Minimum der dazu gehörigen Schallimpulse. Kurzes Referat im Jahresber. d. physikal. Vereins zu Frankfurt a. M. (1879/80), 30.

Kohlrausch, W., Ein Beitrag zur Kenntnis der Empfindlichkeit des Gehörssinns. Wiedemanns Ann. 7, 335. (1879.)

——, Über Töne, die durch eine begrenzte Anzahl von Impulsen erzeugt werden. Wiedemanns Ann. 10, 1. (1880.)

Hensen, V., Physiologie des Gehörs. Hermanns Handbuch der Physiol. III, 2. (1880.)

Stumpf, C., Tonpsychologie Bd. I (1883). Bd. II (1890).

Mach, E., Beiträge zur Analyse der Empfindungen (1886), S. 117.

Martius, G., Über die Reaktionszeit und Perzeptionsdauer der Klänge. Philos. Studien VI, 394. (1890.)

——, Über den Einfluß der Intensität auf die Reaktionsdauer der Reize. ibidem VII, 469. (1891.)

Cross und Maltby, Proceed. Amer. Akad. Boston. 19, 222. (1891.)

Herronn, E. F. und G. F. Yeo, Notes of the Audibility of single Sound Waves, and the number of Vibrations necessary to produce a Tone. Proc. Roy. Soc. 50, 318. (1892.)

Schulze, Rudolf, Wundt: Physiologische Psychologie. 5. Aufl. II, 91. (1902.)
— Über Klanganalyse. Wundt, Philos. Stud. 14, S. 471.

Abraham, O. und L. Brühl, Wahrnehmung kürzester Töne und Geräusche. Z. für Ps. u. Phys. d. S. 18, 207. (1898.)

Abraham, O. und K. L. Schaefer, Über die maximale Geschwindigkeit von Tonfolgen. ibidem XX, 408. (1899).

Abraham, O., Über das Abklingen von Tonempfindungen, ibidem XX, 417. (1899.)

Hensen, V., Das Verhalten des Resonanzapparates im menschlichen Ohr. Sitzungsbericht d. preußischen Akademie d. Wissenschaften. XXXVIII, 904. (1902.)

Stumpf, C., Über das Erkennen von Intervallen und Akkorden bei sehr kurzer Dauer. Z. für Ps. u. Phys. d. S. 27. (1902.)

Hensen, V., Demonstration der Dämpfung im menschlichen Ohr. Sixième congrès international des Physiologistes. Tenu à Bruxelles (1904).

Exner, S. und S. Pollak, Beitrag zur Resonanztheorie der Tonempfindungen. Z. für Ps. u. Physiol. d. S. 32, 305. (1903.)

Vita.

Ich, Rudolf Bode, ev. Konf., wurde am 3. Februar 1881 in Kiel als Sohn des Kaufmanns L. Bode geboren. Nachdem ich das humanistische Gymnasium meiner Vaterstadt Ostern 1901 mit dem Reifezeugnis verlassen hatte, bezog ich die Universität Kiel und hörte philosophische Vorlesungen. Michaelis 1901 ging ich nach Leipzig und studierte am dortigen Kgl. Konservatorium der Musik Komposition und Klavier, um mich auf den Beruf des Kapellmeisters vorzubereiten. Gleichzeitig setzte ich meine Universitätsstudien fort. Ostern 1904 verlies ich das Konservatorium. An der Universität hörte ich fernerhin philosophische, mathematische, physikalische und musikwissenschaftliche Vorlesungen.

Druck von Breitkopf & Härtel in Leipzig.